

Optisches System zur Verringerung der Reflexion optischer transparenter Substrate

Die Erfindung betrifft ein optisches System zur Verringerung der Reflexion optisch transparenter Substrate. Dabei ist das Schichtsystem mittels auf der Oberfläche eines jeweiligen Substrates alternierend angeordneten Schichten ausgebildet, die jeweils aus einem Stoff mit kleinerer optischer Brechzahl und einem zweiten Stoff mit höherer optischer Brechzahl gebildet sind, ausgebildet. Sie kann bevorzugt im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes eingesetzt werden.

Mit der erfindungsgemäßen Lösung kann eine deutliche Reduzierung der Reflexion von einfallendem Licht an der Oberfläche des jeweiligen Substrates innerhalb eines relativ weit gefassten Wellenlängenbereiches (Spektralbereiches) erreicht werden. Außerdem ist der Einfluss unterschiedlicher Einfallswinkel des Lichtes gegenüber herkömmlichen Lösungen reduziert und es kann eine weitestgehende Farbneutralität erreicht werden. So können erfindungsgemäß beschichtete optisch transparente Substrate für die verschiedensten Applikationen eingesetzt werden. So können solche Schichtsysteme beispielsweise für Brillengläser aus Glas und Kunststoffen, Abdeckungen für elektronische Anzeigeelemente (Displays) sowie auch schützende Abdeckungen bzw. Gehäuse für Kunstgegenstände eingesetzt werden.

So ist es prinzipiell bekannt, Wechselschichtsysteme, die aus einzelnen Schichten, die wiederum aus Stoffen mit unterschiedlichen optischen Brechzahlen gebildet sind, zur Reduzierung von Reflexionen einfallenden Lichtes an Oberflächen an optisch transparenten Sub-

straten auszubilden.

Üblicherweise werden dabei die so genannten 3-Schichtsysteme MHL eingesetzt. Bei solchen Schichtsystemen ist eine erste außen liegende Schicht L, die unmittelbar an die umgebende Atmosphäre, in der Regel Luft, angrenzt, eine Schicht, die eine kleinere optische Brechzahl, als die optische Brechzahl des jeweiligen Substrates, aufweist. Die mittlere Schicht ist aus einem Stoff, der eine größere optische Brechzahl aufweist und die M-Schicht weist eine optische Brechzahl auf, die zwischen der optischen Brechzahl des Substrates und der höheren optischen Brechzahl liegt.

Dabei werden für diese Einzelschichten Schichtdicken gewählt, die der optischen Dicke (Produkt aus physikalischer Dicke und optischer Brechzahl), die $1/4$ einer vorgegebenen Wellenlänge λ , entsprechen, für die jeweils beiden außen liegenden Schichten eines solchen 3-Schichtsystemes gewählt. Die dazwischen liegende Schicht aus dem Stoff mit der höheren optischen Brechzahl wird im Gegensatz dazu mit einer optischen Dicke von $1/2$ dieser Wellenlänge λ ausgebildet. Diese vorgegebene Wellenlänge ist dabei aus einem Wellenlängenintervall, in dem die Reduzierung der Reflexion des Lichtes erfolgen soll, ausgewählt worden und liegt üblicherweise im Bereich zwischen 480 und 600 nm.

In US 3,432,225 wird vorgeschlagen, anstelle eines solchen dreischichtigen Aufbaus einen dreischichtigen Ansatz zu wählen, bei dem der Schichtbereich mit der mittleren optischen Brechzahl durch anrechenbare Teile von Schichten, die aus den Stoffen mit der kleineren optischen Brechzahl und der größeren optischen Brechzahl gebildet sind, ersetzt wird.

Hier werden wieder die Drei-Schichtdicken, die $1/4$ einer Wellenlänge λ entsprechen, ausgenutzt.

5 Mit diesen so genannten klassischen Antireflexionsbeschichtungen, die häufig auch in Kombination mit Hartschichten auf Kunststoffsubstraten eingesetzt werden, können der Anteil des an den Oberflächen reflektierten sichtbaren Lichtes im Wellenlängenbereich
10 zwischen 420 nm und 680 nm im Mittel auf $\leq 1\%$ reduziert werden. Dafür zeigt sich aber ein Farbeindruck in Richtung blau oder grün, der bereits bei geringfügigen Abweichungen bei der Ausbildung solcher Schichtsysteme zu Veränderungen führt, so dass es
15 beispielsweise bei der Reparatur von Brillen erforderlich wird, beide Gläser einer Brille auszutauschen, obwohl lediglich eines ausgetauscht werden müsste.

20 Bei den bekannten Lösungen sind solche Farbänderungen auch nachteilig, wenn unterschiedliche Lichteinfallswinkel oder Blickwinkel auftreten können. Bei Lichteinfall in schräg geneigtem Winkel erhöht sich wieder der reflektierte Anteil des Lichtes deutlich.

25 Bei den bekannten Lösungen ist es außerdem problematisch, die gewünschte deutliche Reduzierung des reflektierten Anteils des jeweiligen Lichtwellenspektrums, ohne die Erzeugung eines Farbeindrucks, bei
30 Substraten, deren optische Brechzahl relativ klein ist, zu erzielen. Dies trifft insbesondere auf Substratwerkstoffe, wie Glas und geeignete Kunststoffe, wie beispielsweise Polymethylmetacrylat oder Polycarbonat zu, deren optische Brechzahlen im Bereich zwischen
35 1,5 und 1,6 bei einer mittleren Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegen, da es nur einige wenige

ausgewählte Stoffe oder chemische Verbindungen gibt, deren optische Brechzahl kleiner als die eines solchen Substrats ist.

5 Es ist daher Aufgabe der Erfindung, den reflektierten Anteil von einfallendem Licht in einen breiten Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes, der an der Oberfläche reflektiert wird, zu reduzieren, wobei ein gezielter Einfluss auf den Wert der Reflexion selbst,
10 auf den jeweiligen Wellenlängenbereich, in dem eine Reduzierung erreichbar ist, und/oder eine gezielte Einflussnahme und auf einen sich ergebenden Farbeindruck möglich wird.

15 Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit Hilfe eines optischen Systems, wie es mit dem Anspruch 1 definiert ist, gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungsformen und Weiterbildungen der Erfindung können mit den in den untergeordneten Ansprüchen bezeichneten Merkmalen
20 erreicht werden.

Das erfindungsgemäße optische Schichtsystem ist aus alternierend angeordneten Schichten eines Stoffes mit kleinerer optischer Brechzahl und Schichten höherer
25 optischer Brechzahl gebildet.

Dabei werden Schichtstapel aus solchen Schichten gebildet. Diese Schichtstapel weisen dann in Bezug zu einer vorgebbaren Wellenlänge λ eine äquivalente optische
30 Brechzahl auf. Diese äquivalente optische Brechzahl ist kleiner als die optische Brechzahl des Substrates. Dabei sollte jeder Schichtstapel optische so betrachtet werden, dass er eine Einzelschicht bildet.

35 Die vorgebbare Wellenlänge λ kann im Wellenlängenbe-

reich liegen, in dem die reduzierte Reflektivität erreicht werden soll.

Ein einzelner solcher Schichtstapel wird aus mindestens einer Schicht H eines Stoffes mit höherer optischer Brechzahl gebildet. Diese Schicht H ist von zwei Schichten, die aus einem Stoff mit der kleineren optischen Brechzahl gebildet sind, beidseitig eingefasst.

Dementsprechend können in einem Schichtstapel auch mehrere Schichten H eines Stoffes mit höherer optischer Brechzahl von Schichten L von beiden Seiten eingefasst sein.

Ein erfindungsgemäßes optisches Schichtsystem ist dabei aus mindestens zwei übereinander ausgebildeten Schichtstapeln ausgebildet. Dabei weisen die Schichtstapel eine sich voneinander unterscheidende äquivalente optische Brechzahl auf und die äquivalente optische Brechzahl der Schichtstapel verkleinert sich ausgehend vom Substrat hin zum umgebenden Medium (in der Regel Luft).

Die einzelnen Schichtstapel eines optischen Schichtsystems sollen eine optische Dicke aufweisen, die mindestens dem 2-fachen von $1/4$ der vorgebbaren Wellenlänge λ entspricht. Bevorzugt sollten sie optische Dicken aufweisen, die einem ganzzahligen Vielfachen von $1/4$ der vorgebbaren Wellenlänge λ entsprechen.

Vorteilhaft ist es außerdem, dass sämtliche äquivalenten optischen Brechzahlen aller Schichtstapel kleiner, als die optische Brechzahl des Stoffes, aus dem die Schichten L mit kleinerer optischer Brechzahl gebildet sind, sind.

Dementsprechend reduziert sich die äquivalente optische Brechzahl von Schichtstapeln, ausgehend von der Oberfläche des Substrates bis hin zum umgebenden Medium schrittweise.

Bei dem erfindungsgemäßen Schichtsystem können alle einzelnen Schichten H und L des gesamten Schichtsystems eine optische Schichtdicke aufweisen, die von einem ganzzahligen Vielfachen von $1/4$ der vorgebbaren Wellenlänge λ abweicht.

Für den Fall, dass für eine einzelne Schicht, die unmittelbar auf der Oberfläche des Substrates ausgebildet ist, ein Stoff eingesetzt worden ist, dessen optische Brechzahl kleiner, als die optische Brechzahl des Substrates ist, kann ein Teil dieser Schicht, als $\lambda/4$ -Schicht für die in Rede stehende vorgegebene Wellenlänge λ ausgebildet sein.

Das erfindungsgemäße optische Schichtsystem kann vorteilhaft auf Substraten ausgebildet sein, deren optische Brechzahl ≤ 2 , also auch im Bereich zwischen 1,5 und 1,6 ist.

Die Schichten L, deren optische Brechzahl kleiner ist, können vorteilhaft aus SiO_2 oder MgF_2 gebildet sein, da diese optischen Brechzahlen in jedem Fall kleiner als die optischen Brechzahlen üblicherweise verwendeter Substratwerkstoffe ist.

Die Schichten H, deren optische Brechzahl größer ist, können aus TiO_2 , HfO_2 , ZrO_2 , Ta_2O_5 und/oder Nb_2O_5 , deren optische Brechzahlen n im Bereich von 1,9 bis 2,35 liegen, gebildet sein.

Die Anzahl der einzelnen Schichten, die jeweils einen einzelnen Schichtstapel bilden, kann bei drei bis sieben Schichten gewählt worden sein, wobei durch die Anzahl von Schichten für die jeweiligen Schichtstapel und dementsprechend auch der Dicke der Schichtstapel, der Wellenlängenbereich, in dem die Reflexion reduziert wird, beeinflusst werden kann.

Die Anzahl der Schichten sämtlicher Schichtstapel des Schichtsystems können jeweils gleich sein. Dies trifft sinngemäß auch für die optische Schichtdicke der Schichtstapel eines optischen Schichtsystems zu, die ebenfalls gleich sein kann.

Vorteilhaft ist es außerdem, die oberste Schicht des Schichtsystems, die unmittelbar mit dem umgebenden Medium in Kontakt steht, aus einem Stoff mit kleinerer optischer Brechzahl auszubilden. Dabei sollte diese eine optische Schichtdicke aufweisen, die größer als $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ ist.

Beim erfindungsgemäßen optischen Schichtsystem können sich die Gesamtschichtdickenanteile von Schichten H, die aus einem Stoff mit größerer optischer Brechzahl gebildet sind, ausgehend von der Substratoberfläche in Richtung auf das umgebende Medium erhöhen, so dass die aufsummierten optischen Schichtdicken H in dieser Richtung gegenüber den aufsummierten optischen Schichtdicken von Schichten L oder Teilen solcher Schichten sukzessive erhöht sind.

Die jeweilige vorgegebene Wellenlänge λ sollte bevorzugt aus dem Wellenlängenbereich zwischen 480 und 600 nm, bevorzugt zwischen 500 und 550 nm ausgewählt sein.

Das gesamte Schichtsystem kann eine physikalische Dicke im Bereich zwischen 800 bis 3000 nm aufweisen, so dass insbesondere bei Substraten aus Kunststoffen ein verbesserter mechanischer Schutz und eine ausreichend hohe Haftfestigkeit und Kratzfestigkeit gegeben ist.

Bei den bezeichneten Kunststoffsubstraten wirkt es sich außerdem vorteilhaft aus, dass ein Anteil an Schichten H, die aus einem Stoff mit höherer optischer Brechzahl gebildet werden müssen, für ein gesamtes optisches Schichtsystem relativ klein ist, so dass bei der Schichtausbildung im Vakuum nur eine geringfügige Substraterwärmung zu verzeichnen ist.

Die jeweilige Anzahl von Schichtstapeln und gegebenenfalls eine $\lambda/4$ -Schicht aus einem Stoff mit kleinerer optischer Brechzahl, als der Substratwerkstoff, geben die Anzahl von Schritten vor, mit denen die optische Brechzahl eines optischen Schichtsystems, ausgehend von der Substratoberfläche bis hin zum umgebenden Medium reduziert werden kann.

Durch eine bestimmte Auswahl der Dicke der jeweiligen Schichtstapel, als ganzzahliges Vielfaches einer $\lambda/4$ Schichtdicke (QW) kann der Wellenlängenbereich, in dem die gewünschte reflexionsmindernde Wirkung erreicht werden kann, beeinflusst werden. So kann ein größerer Wellenlängenbereich abgedeckt werden, wenn Schichtstapel, deren optische Schichtdicke größer als das 3-fache von $1/4$, der vorgegebenen Wellenlänge ist, eingesetzt werden.

Nachfolgend soll die Erfindung beispielhaft näher erläutert werden.

Dabei zeigen:

- Figur 1 ein Diagramm mit äquivalenten optischen Brechzahlen eines ersten Beispiels eines optischen Schichtsystems;
- 5
- Figur 2 ein Diagramm der tatsächlichen optischen Brechzahlen innerhalb des optischen Schichtsystems;
- 10
- Figur 3 optische Brechzahlen eines optischen Schichtsystems nach erfolgter rechnerischer Optimierung;
- 15
- Figur 4 ein Diagramm mit Anteilen reflektierten Lichtes innerhalb eines Wellenlängenintervalls für ein optisches Schichtsystem nach Beispiel 1 und eine entsprechend berechnete optimierte Variante dazu;
- 20
- Figur 5 ein Diagramm berechneter äquivalenter optischer Brechzahlen von Schichtstapeln eines optischen Systems für ein zweites Beispiel;
- 25
- Figur 6 ein Diagramm mit tatsächlichen optischen Brechzahlen für ein optisches System nach Beispiel 2;
- 30
- Figur 7 berechnete optische Brechzahlen für ein optimiertes optisches Schichtsystem nach Beispiel 2;
- 35
- Figur 8 ein Diagramm des Anteils reflektierten Lichtes innerhalb eines Wellenlängenbereiches eines optischen Systems nach Beispiel 2 in ausgeführter und berechneter optimierter Form und

Figur 9 ein Diagramm, dem die Anteile an reflektiertem Licht im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 800 nm für ein Substrat aus Polycarbonat mit einem Schichtsystem nach Beispiel 1 entnommen werden können.

Beispiel 1

Mit dem Beispiel 1 soll eine Reduzierung der Reflexion von Licht im Wellenlängenbereich zwischen 400 bis 800 nm, die $\leq 0,4\%$ liegt, erreicht werden.

Das optische Schichtsystem wurde auf einem Substrat mit einer optischen Brechzahl von 1,52 ausgebildet. Es wurden Schichten L aus SiO_2 mit einer Brechzahl $n = 1,46$ und Schichten H aus TiO_2 mit einer höheren optischen Brechzahl $n = 2,35$ ausgebildet.

Die Auslegung des optischen Schichtsystems erfolgte auf die vorgegebene Wellenlänge $\lambda = 500$ nm und es wurden insgesamt 17 solcher alternierend im Wechsel angeordneter Einzelschichten ausgebildet.

Der Aufbau des Schichtsystems kann nachfolgender Tabelle 1a entnommen werden, wobei für die einzelnen Schichten L und H die jeweiligen tatsächlichen Schichtdicken $d(\text{nm})$, die optischen Schichtdicken $n \times d(\text{nm})$, die jeweiligen Verhältnisse c in Bezug zu $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ angegeben worden sind.

Des Weiteren sind insgesamt fünf einzelne Schichtstapel A1 bis E1 mit ihrer jeweiligen optischen Schichtdicke (QW-Dicke) in Bezug zu $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ sowie die jeweilige äquivalente opti-

5 sche Brechzahl der Schichtstapel A1 bis E1 dabei angegeben. Dabei ist A1 eine unmittelbar auf der Oberfläche des Substrates angeordnete Schicht, aus dem Stoff mit der kleineren optischen Brechzahl mit einer Schichtdicke von $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ .

10 Eine unmittelbar auf der Oberfläche des Substrates ausgebildete Schicht 1a (A1), die aus SiO_2 , als Stoff mit kleinerer optischer Brechzahl ausgebildet worden ist, weist eine Dicke auf, die $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ entspricht. Dies ist günstig, da SiO_2 eine optische Brechzahl von 1,46 aufweist, die wiederum kleiner als die optische Brechzahl des Substratwerkstoffes ist.

15 Mit Tabelle 1b sollen die abgestuften äquivalenten Brechzahlen der Schichtstapel verdeutlicht werden.

Tabelle 1a. Beispiel 1

Schicht	Material	n	D (nm)	n*d (nm)	c	Stapel	QW-Dicke	Äquivalente Brechzahl
1a	L	1.46	85.6	125.0	1.000	A1	1	1.46
1b	L	1.46	121.4	177.2	1.418	B1	4	1.372
2	H	2.35	7.9	18.6	0.148			
3	L	1.46	70.2	102.5	0.820			
4	H	2.35	14.4	33.8	0.177			
5a	L	1.46	120	175.2	1.402			
5b	L	1.46	115.7	168.9	1.351	C1	4	1.312
6	H	2.35	14.4	33.8	0.271			
7	L	1.46	58.6	85.6	0.684			
8	H	2.35	16.2	38.1	0.304			
9a	L	1.46	114.1	166.6	1.333			
9b	L	1.46	109.2	159.4	1.275	D1	4	1.252
10	H	2.35	22.1	51.9	0.415			
11	L	1.46	45.4	66.3	0.529			
12	H	2.35	24.3	57.1	0.456			
13a	L	1.46	107.4	156.8	1.254			
13b	L	1.46	101	147.5	1.180	E1	4	1.192
14	H	2.35	32.3	75.9	0.608			
15	L	1.46	28.2	41.2	0.329			
16	H	2.35	35.8	84.1	0.673			
17	L	1.46	98.4	143.7	1.149			

5

Tabelle 1b Stufenbrechzahl n_{sk} , Stufendifferenz Δn_s und Stapelbrechzahl n_E (äquivalente Brechzahl) für Beispiel 1, k ist die Stapelnummer.

k	Stapel	n_{sk}	Δn_{sk}	n_{Ek}
0	-	1.520	-	-
1	A1	1.402	0.118	1.460
2	B1	1.342	0.060	1.372
3	C1	1.282	0.060	1.312
4	D1	1.222	0.060	1.252
5	E1	1.162	0.060	1.192

Mit der Tabelle 1a wird außerdem deutlich, dass Schichten L, aus SiO₂ mit kleinerer optischer Brechzahl in den Schichtstapeln A1 bis E1 Schichtdickenanteile darstellen. Dies betrifft die Schichten 1b und 5a, 5b und 9a, 9b und 13a, 13b, die an äußeren Rändern von Schichtstapeln B1 bis E1 angeordnet sind.

Die äußerste Schicht 17 aus SiO₂ weist eine optische Schichtdicke von 143,7 nm auf, was $1,14 \times 1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge $\lambda = 500$ nm entspricht.

Die einzelnen Schichtdicken und die Schichtstapel wurden wie folgt bestimmt:

Schritt 1.

Es wird eine Zahl q vorgegeben, die die Anzahl der einzusetzenden Schichtstapel bestimmt.

Schritt 2.

Es wird eine Restreflexion R_0 definiert, die bei der vorgegebenen Wellenlänge λ erreicht werden soll. Mit diesem Wert und der Brechzahl des umgebenden Mediums n_0 wird eine Zielbrechzahl n_{0T} bestimmt nach

$$n_{0T} = \frac{n_0 + \sqrt{R_0}}{n_0 - \sqrt{R_0}}$$

Schritt 3.

Die Differenz der Substratbrechzahl n_s und der Zielbrechzahl n_{0T} wird durch q geteilt und mit dieser Differenz werden neue Stufenbrechzahlen n_{sk} gebildet

nach

$$\Delta n_s = \frac{1}{q}(n_s - n_{ot})$$

5 $n_{sk} = n_{sk-1} - \Delta n_s$

mit $k = 1 \dots q$ als Index der Stufen und mit $n_{s0} = n_s$ und
 $n_{sq} = n_{ot}$

10 Schritt 4.

Für jede Stufe wird je ein Schichtstapel berechnet,
 dessen optische Schichtdicke dem ein- bis fünffachen
 von $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ entsprechen
 15 sollte, wobei jeder Schichtstapel einer äquivalenten
 Brechzahl entspricht, die nach

$$n_{Ek} = \sqrt{n_{sk-1} n_{sk}}$$

20 berechnet wird.

Schritt 5.

Ist die äquivalente Brechzahl des ersten Schichtsta-
 25 pels annähernd gleich der Brechzahl des niedrigbre-
 chenden Stoffes L, wird der erste Schichtstapel mit
 nur einer $\lambda/4$ -Schicht (d.i. eine Schicht, deren opti-
 sche Dicke gleich $1/4$ einer vorgegebenen Wellenlänge
 λ ist) des Stoffes mit der kleinen optischen Brech-
 30 zahl gebildet.

Schritt 6.

Aus der Brechzahl dieser Schicht und des Substrates wird eine neue Brechzahl n_{s1} der ersten Substratstufe gebildet nach

$$n_{s1} = \frac{n_L^2}{n_s}$$

Anschließend wird wieder nach Schritt 3 und 4 verfahren.

Schritt 7.

Von Vorteil für den Verlauf der Restreflexion kann es sein, den linearen Zusammenhang der gestuften äquivalenten Brechzahlen nach Schritt 3 statt in einem Schritt in mehreren Schritten vorzunehmen.

Beispiel 1: Zuerst wird die erste äquivalente Brechzahl des Stoffes mit der kleineren Brechzahl bestimmt. Danach werden alle weiteren gestuften äquivalenten Brechzahlen nach dem linearen Zusammenhang aus Schritt 3 bestimmt.

Beispiel 2: Zuerst wird die erste äquivalente Brechzahl wieder durch die Brechzahl des Stoffes mit der kleineren Brechzahl bestimmt. Danach werden nur zwei weitere gestufte äquivalente Brechzahlen bestimmt und im Anschluss daran

die restlichen beiden äquivalenten optischen Brechzahlen.

Schritt 8.

5

Je nach gewünschter Bandbreite des Reflexionsbereiches werden für die Schichtstapel optische Schichtdicken gewählt, die einem drei-, vier- oder fünffachen von $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ entsprechen.

10

Schritt 9.

15

Bei Schichtstapeln, die eine optische Schichtdicke aufweisen, die dem dreifachen von einem $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ entspricht, die die gewünschte äquivalente Brechzahl aufweisen und aus drei Schichten gebildet sind, dabei deren erste und dritte eine L Schicht und deren mittlere Schicht eine H Schicht sind, werden die optischen Schichtdicken der Schichten nach der Formel berechnet:

20

$$c_H = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_E / n_L - n_L / n_E}{n_L / n_H - n_H / n_L} \right)$$

$$c_L = 1 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arccot} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{n_L}{n_H} + \frac{n_H}{n_L} \right) \tan \varphi_H \right\}$$

25

wobei die beiden L-Schichten identisch sind und

$$\varphi_H = \frac{\pi}{2} \cdot c_H \quad \text{ist.}$$

Schritt 10.

5 Für jede äquivalente Brechzahl (eines Schichtstapels mit einer optischen Schichtdicke, die dem dreifachen von 1/4 der vorgegebenen Wellenlänge λ entspricht) werden die zugehörigen optischen Dicken nach Schritt 9 bestimmt.

Schritt 11.

10

Bei Schichtstapeln mit einer optischen Schichtdicke, die dem vierfachen von 1/4 der vorgegebenen Wellenlänge λ entspricht, wird die entsprechende äquivalente Brechzahl mit fünf Schichten gebildet, deren erste, dritte und fünfte L Schichten und deren zweite und vierte Schicht H Schichten sind. Die optischen Schichtdicken werden nach den Formeln berechnet:

15

$$c_{HA} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_L / n_A - n_A / n_L}{n_L / n_H - n_H / n_L} \right)$$

20

$$c_{HB} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_L / n_B - n_B / n_L}{n_L / n_H - n_H / n_L} \right)$$

$$c_{LA} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arccot} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{n_L}{n_H} + \frac{n_H}{n_L} \right) \tan \varphi_{HA} \right\} ; \quad \left(\varphi_{HA} = \frac{\pi}{2} \cdot c_{HA} \right)$$

25

$$c_{LB} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arccot} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{n_L}{n_H} + \frac{n_H}{n_L} \right) \tan \varphi_{HB} \right\} ; \quad \left(\varphi_{HB} = \frac{\pi}{2} \cdot c_{HB} \right)$$

mit den Hilfsbrechzahlen n_A und n_B , die berechnet

werden nach

$$n_A = x + \sqrt{x^2 + y}$$

$$n_B = \frac{n_A n_S}{n_E}$$

5

mit

$$x = \frac{n_L (n_0 + n_S) (n_L^2 - n_E^2)}{2n_E^2 (n_E + n_S)}$$

und

$$y = \frac{n_L^4}{n_S n_E}$$

10

Die optischen Schichtdicken der einzelnen Schichten
ergeben sich dann zu

$$C1(L) = 1 + C_{LA}$$

$$C2(H) = C_{HA}$$

$$C3(L) = C_{LA} + C_{LB}$$

$$C4(H) = C_{HB}$$

15

$$C5(L) = 1 + C_{LB}$$

Schritt 12.

20

Schritt 11 wird für jede äquivalente Brechzahl der
Schichtstapel ausgeführt, wobei die Brechzahlen n_E ,
 n_S und n_0 entsprechend durch die laufenden Werte n_{Ek} ,
 n_{Sk-1} bzw. n_{Sk} nach Schritt 3 und 4 zu ersetzen sind.

25

Dadurch reduziert sich die absolute Gesamtanzahl der
tatsächlich auszubildenden Schichten eines solchen
optischen Schichtsystems von 21 auf praktisch 17.

Die Schichtstapel A1 bis E1 sind jeweils aus fünf
Schichten aus jeweils alternierend angeordneten SiO_2

als L-Schichten und TiO_2 als H-Schichten ausgebildet.

Wie mit Figur 4 gezeigt, kann eine deutliche Reduzierung des reflektierten Anteils an Licht im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 800 nm mit einem solchen optischen Schichtsystem, wie es mit Beispiel 1 definiert worden ist, erreicht werden. Durch eine rechnerische Nachoptimierung (refinement) dieses Schichtsystems konnte das Reflexionsverhalten, wie mit der dickeren Linie dargestellt, über den bezeichneten Wellenlängenbereich vergleichmäßigt, und zumindest teilweise zusätzlich noch reduziert werden, da die realen optischen Brechzahldispersionen berücksichtigt werden können. Sie vorab berechneten Schichtdicken veränderten sich dabei nur unwesentlich (s. Figur 3).

Beispiel 2

Mit einem optischen Schichtsystem für ein Beispiel 2 soll der Anteil an reflektiertem Licht im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm bis 570 nm auf unterhalb 0,1 % gesenkt werden.

Auch hier wurde ein Substrat, das eine optische Brechzahl von 1,52 aufwies, mit einem entsprechend diesem Beispiel ausgebildeten erfindungsgemäßen optischen Schichtsystem versehen. Es wurden wieder alternierend wechselnd angeordnete Schichten L, aus SiO_2 und Schichten H aus TiO_2 ausgebildet.

Der Aufbau des optischen Schichtsystems nach diesem Beispiel 2 ergibt sich mit nachfolgender Tabelle 2a. Die Tabelle 2b verdeutlicht wieder die Abstufungen äquivalenter Brechzahlen, was in Figur 5 schematisch verdeutlicht wird.

Tabelle 2a. Beispiel 2

Schicht	Material	n	d (nm)	n*d (nm)	c	Stapel	QW-Dicke	Äquivalente Brechzahl
1a	L	1.46	85.6	125.0	1.000	A2	1	1.46
1b	L	1.46	122.8	179.3	1.435	B2	3	1.334
2	H	2.35	6.2	14.6	0.117			
3a	L	1.46	122.8	179.3	1.435			
3b	L	1.46	116.1	169.5	1.356	C2	3	1.2
4	H	2.35	13.8	32.4	0.261			
5a	L	1.46	116.1	169.5	1.356			
5b	L	1.46	110.1	160.7	1.286	D2	3	1.1
6	H	2.35	21.0	49.4	0.395			
7a	L	1.46	110.1	160.7	1.286			
7b	L	1.46	105.2	153.6	1.229	E2	3	1.033
8	H	2.35	27.0	63.5	0.507			
9	L	1.46	105.2	153.6	1.229			

5

Tabelle 2b. Stufenbrechzahl n_{sk} , Stufendifferenz Δn_s und Stapelbrechzahl n_E (äquivalente Brechzahl) für Beispiel 2, k ist die Stapelnummer.

k	Stapel	n_{sk}	Δn_{sk}	N_{Ek}
0	-	1.520	-	-
1	A2	1.402	0.118	1.460
2	B2	1.269	0.133	1.334
3	C2	1.135	0.134	1.200
4	D2	1.066	0.069	1.100
5	E2	1.001	0.065	1.033

Es wird deutlich, dass bei diesem Schichtsystem wieder fünf übereinander ausgebildete Schichtstapel A2 bis E2 ausgebildet worden sind, wobei in jedem der Schichtstapel lediglich eine Schicht H aus TiO_2 angeordnet ist. Eine solche Schicht H ist wiederum von beiden Seiten mit Schichten L aus SiO_2 eingefasst. Insgesamt wurden 9 Schichten ausgebildet. Die Schichten 1b und 3a, 3b und 5a, 5b und 7a, 7b stellen Schichtdickenanteile von Schichten L, aus einem Stoff mit kleinerer optischer Brechzahl, dar.

Bei der Auslegung dieses optischen Schichtsystems nach Beispiel 2 wurde wieder von einer vorgegebenen Wellenlänge $\lambda = 500 \text{ nm}$ ausgegangen.

Die Auslegung der Schichtdicken und Schichtstapel wurde, wie beim Beispiel 1 bestimmt.

Die Anteile an reflektiertem Licht im Wellenlängenbereich zwischen 450 und 570 nm sind für das optische Schichtsystem nach Beispiel 2 mit der dünn dargestellten Linie Figur 8 entnehmbar. Die dick nachgezogene Linie ergibt den erreichbaren Anteil reflektierten Lichtes unter Berücksichtigung einer durch Berechnung erreichten nachträglichen Optimierung des Beispiels. Bei einer solchen Nachoptimierung können variable optische Eigenschaften, der die jeweiligen Schichten bildenden Stoffe berücksichtigt werden. Die, wie vorab erläutert, bestimmten Schichtdicken müssen dabei nur geringfügig verändert werden.

Nachfolgend soll eine Möglichkeit zur Ausbildung eines optischen Schichtsystems zur Reduzierung des reflektierten Anteils an Licht auf einem optischen Fenster aus transparentem Polycarbonat erläutert werden. Ein solches Fenster kann beispielsweise eine Ab-

deckung für ein elektronisches Anzeigeelement in Kraftfahrzeugen sein. Es soll mit einem solchen optischen Fenster bei einem Einfallswinkel von 60° des Lichtes kein roter Farbeindruck auftreten.

5

Das optische Schichtsystem wies eine Gesamtdicke von 1600 nm auf und es wurden wiederum alternierend wechselnd Schichten aus SiO_2 und TiO_2 durch Elektronenstrahlverdampfung abgeschieden. Bei der Abscheidung im Vakuum wurde die jeweilige Schicht mit Argonionen, die eine Energie von 80 eV (SiO_2) und 120 eV (TiO_2) aufweisen, bei einer Stromdichte von ca. $0,1 \text{ mA/cm}^2$ beschossen.

10

Es wurde ein Schichtaufbau gewählt, wie er dem Beispiel 1, das vorab beschrieben worden ist, entspricht. Dabei wurde eine Nachoptimierung der jeweiligen Schichtdicken unter Berücksichtigung der jeweiligen realen optischen Brechzahl dispersionen vorgenommen.

15

20

Der reflektierte Anteil konnte im Wellenlängenbereich zwischen 380 nm bis 770 nm unterhalb 1 % gehalten werden, wie dies dem in Figur 9 gezeigten Diagramm entnommen werden kann.

25

Die Transparenz im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes konnte auf 98 % bei einer beidseitigen Ausbildung eines optischen Schichtsystems auf dem optischen Fenster, als Substrat, gegenüber 92 % bei einer einseitigen Beschichtung erhöht werden.

30

Bei in einem schräg geneigten Winkel einfallendem Licht war ein leicht grünlicher Farbeindruck zu verzeichnen. Bei senkrechtem Lichteinfall wurde Farbneutralität erreicht.

35

5 Das auf dem Polycarbonat-Substrat ausgebildete optische System widerstand dem Abriebtest nach ISO 9211-02-04 ohne Defektbildung sowie einen Abriebtest mit Stahlwolle. Die Kratzfestigkeit des Polycarbonat-Substrates konnte so gegenüber dem unbeschichteten Substratwerkstoff deutlich erhöht werden.

Patentansprüche

1. Optisches Schichtsystem, zur Verringerung der
5 Reflexion optisch transparenter Substrate, mit
 auf der Oberfläche eines Substrates alternierend
 angeordneten Schichten eines Stoffes mit kleinerer
 optischer Brechzahl und höherer optischer
 Brechzahl,
10 aus denen Schichtstapel (B,C,D,E) mit mindestens
 einer Schicht H eines Stoffes mit höherer optischer
 Brechzahl, die von zwei Schichten
 aus einem Stoff mit kleinerer optischer Brech-
15 zahl eingefasst ist, gebildet sind,

 die Schichtstapel (B,C,D,E) in Bezug zu einer
 vorgebbaren Wellenlänge λ eine äquivalente optische
 Brechzahl aufweisen, die kleiner als die
20 optische Brechzahl des Substrates ist; dabei

 mindestens zwei Schichtstapel übereinander ausgebildet
 sind, deren jeweilige äquivalente optische
 Brechzahl sich, ausgehend vom Substrat verkleinert und
25

 die einzelnen Schichtstapel (B,C,D,E) eine optische
 Dicke, die mindestens dem 2-fachen von $1/4$
 der vorgebbaren Wellenlänge λ entspricht, auf-
30 weisen.

2. Schichtsystem nach Anspruch 1,
 dadurch gekennzeichnet, dass die äquivalente optische
 Brechzahl jedes Schichtstapels (B,C,D,E) kleiner ist,
 als die optische Brechzahl eines
35 Stoffes, aus dem Schichten mit kleinerer opti-

scher Brechzahl gebildet sind.

3. Schichtsystem nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass keine der einzelnen
Schichten H und L des Schichtsystems eine opti-
sche Schichtdicke, die einem ganzzahligen Viel-
fachen von $1/4$ der vorgebbaren Wellenlänge ent-
spricht, aufweist.
4. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden An-
sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine un-
mittelbar auf der Oberfläche des Substrates aus-
gebildete Schicht (A), die aus einem Stoff ge-
bildet ist, deren optische Brechzahl kleiner als
die optische Brechzahl des Substrates ist, eine
 $\lambda/4$ -Schicht bildet.
5. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden An-
sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die opti-
sche Brechzahl des Substrates ≤ 2 ist.
6. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden An-
sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die
Schichten L, deren optische Brechzahl kleiner
ist, aus SiO_2 oder MgF_2 gebildet sind.
7. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden An-
sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die
Schichten H, deren optische Brechzahl größer
ist, aus TiO_2 , HfO_2 , ZrO_2 , Ta_2O_5 und/oder Nb_2O_5
gebildet sind.
8. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden An-
sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die ein-
zelnen Schichtstapel (B,C,D,E) aus drei, fünf
oder sieben Schichten gebildet sind.
9. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden An-

5 sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die in Richtung auf das Umgebungsmedium weisende oberste Schicht, aus dem Stoff mit kleinerer optischer Brechzahl, eine optische Schichtdicke aufweist, die größer als $1/4$ der vorgegebenen Wellenlänge λ ist.

10. 10 Schichtsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sich der Schichtdickenanteil in den Schichtstapeln (B,C,D,E) von Schichten H, die aus einem Stoff mit größerer optischer Brechzahl gebildet sind, ausgehend von der Substratoberfläche in Richtung auf das umgebende Medium erhöht.

15 11. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Schichtsystem eine Dicke im Bereich zwischen 800 bis 3000 nm aufweist.

20 12. Schichtsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vorgegebene Wellenlänge λ , aus dem Wellenlängenbereich zwischen 480 und 600 nm ausgewählt ist.

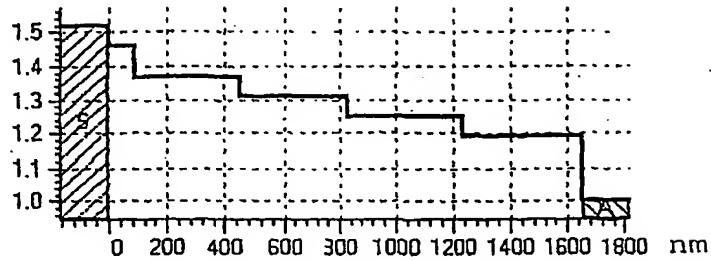


Fig. 1 Berechnete äquivalente Brechzahlen (y-Achse) in Abhängigkeit von der Schichtdicke von Substratseite (S) zur Luftseite (A) für Beispiel 1

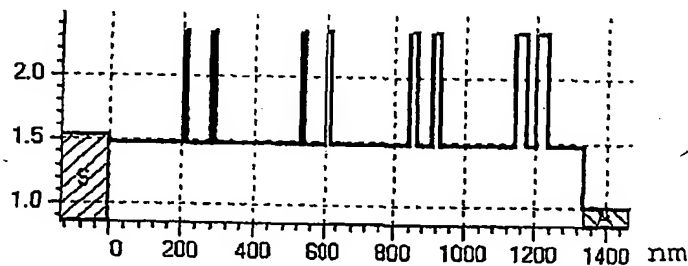


Fig. 2 Reale Brechzahlen (y-Achse) in Abhängigkeit von der Schichtdicke von der Substratseite (S) zur Luftseite (A) für Beispiel 1

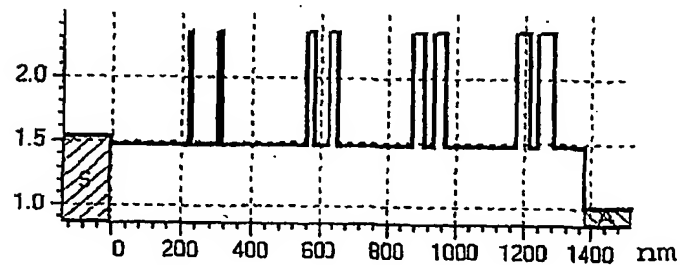


Fig. 3 Reale Brechzahlen (y-Achse) in Abhängigkeit von der Schichtdicke von der Substratseite (S) zur Luftseite (A) Beispiel 1 nach einer Nachoptimierung

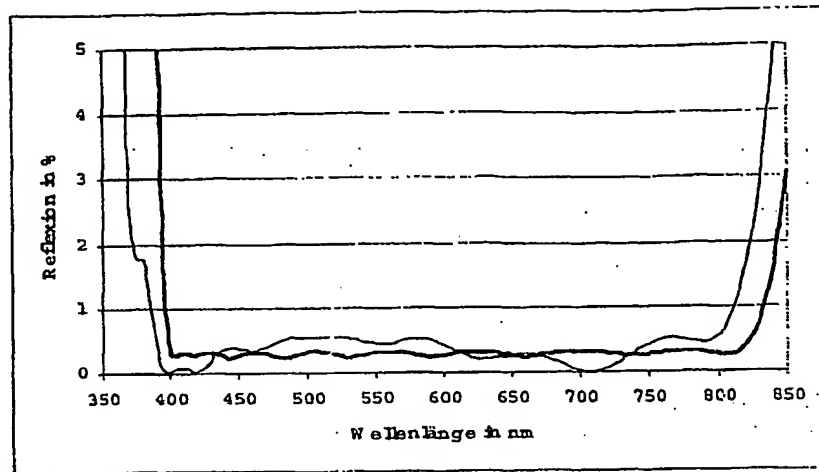


Fig. 4 Reflexion als Funktion der Wellenlänge für Beispiel 1 (Tabelle 1) vor (dünne Linie) und nach (dicke Linie) einer Nachoptimierung

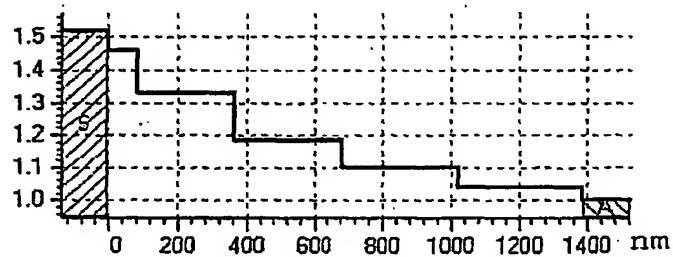


Fig. 5 Berechnete äquivalente Brechzahlen (y-Achse) in Abhängigkeit von der Schichtdicke von der Substratseite (S) zur Luftseite (A) für Beispiel 2

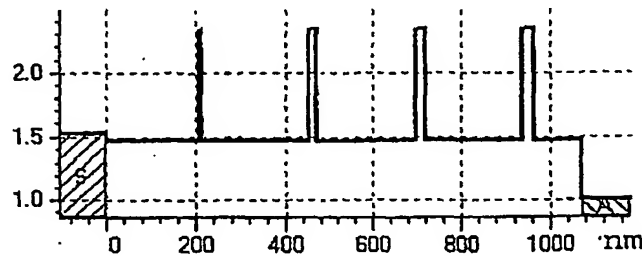


Fig. 6 Reale Brechzahlen (y-Achse) in Abhängigkeit von der Schichtdicke von der Substratseite (S) zur Luftseite (A) für Beispiel 2

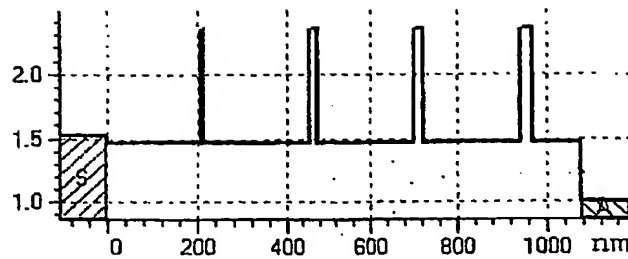


Fig. 7 Reale Brechzahlen (y-Achse) in Abhängigkeit von der von der Schichtdicke von der Substratseite (S) zur Luftseite (A) für Beispiel 2 nach einer Nachoptimierung

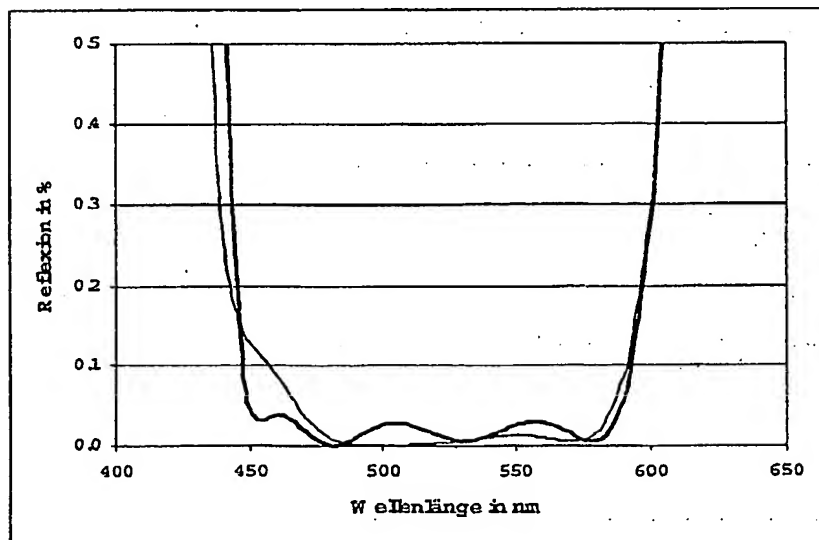


Fig. 8 Reflexion als Funktion der Wellenlänge für Beispiel 2 (Tabelle 2) vor (dünne Linie) und nach (dicke Linie) einer Nachoptimierung

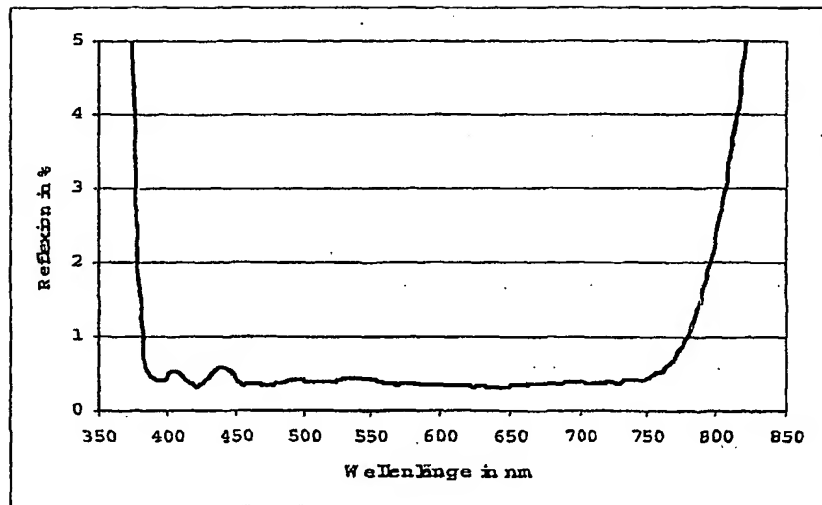


Fig. 9 Gemessenes Reflexionsspektrum eines Polycarbonatsubstrates mit optischem Schichtsystem nach Beispiel 1